

poromedia GmbH, Böblinger Str. 160, 70199 Stuttgart

## Verfahren zum Herstellen von rohrförmigen Membranen

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Herstellen von rohrförmigen Membranen.

5

Durch die EP 0 349 914 B1 ist ein Verfahren zum Herstellen von rohrförmigen Vlieskörpern aus einem Streifen eines thermoplastischen Trägervlieses bekannt, der zur Bildung eines Vliesrohres in Form einer Spirale derart aufgewickelt wird, dass die Längsränder des Streifens sich zumindest im gewickelten Bereich des Vliesrohres entlang einer Verbindungsnaht überlappen, wobei zur Bildung dieser Verbindungsnaht die Längsränder thermisch miteinander verschweißt werden. Durch das Aufwickeln des Streifens zum spiralförmigen Vlieskörper entsteht ein Hohlstab, der an seinem freien Ende eine Austrittsöffnung aufweist, über die eine Beschichtungslösung auf die Innenwand des gewickelten Vliesrohres aufbringbar ist, wobei durch den anschließenden Kontakt mit einer Koagulationslösung eine rohrförmige Membran gebildet wird.

15

Dahingehende Rohrmembrane sind insbesondere für die Ultra- und Nanofiltration geeignet, wobei die dahingehenden Membranen mikroporöse Filtermedien ausbilden, deren Durchtrittsporen derart klein sind, dass sie nicht nur eine Barriere für Partikel jeglicher Art und Form bilden wie Verunreinigungen, Schwermetalle usw. sondern auch für sämtliche Mikroorganismen,

20

beispielsweise in Form von Bakterien, Parasiten und Viren. Die dahingehend aktive Schicht der Membranen wird in der Fachsprache auch als semipermeable Schicht bezeichnet. Nachteilig bei den derart hergestellten Rohrmembranen ist, dass diese häufig unter der Druckbeanspruchung des zu filtrierenden Fluids im Bereich der thermischen Verbindungsnahte aufreißen und demgemäß versagen. Um dem zu begegnen, ist in der deutschen Offenlegungsschrift 2 255 989 zwar bereits vorgeschlagen worden, die im übrigen auch dünnen und zerbrechlichen, halb durchlässigen Membranrohre außenumfangseitig mit einer Verstärkung in Form eines Faserflechtgebildes zu umgeben, um dergestalt dem hohen hydraulischen Innendruck entgegen zu wirken; allein das dahingehend bekannte Verfahren ist aufwendig und mithin teuer in der Herstellung und das unmittelbar an der halbdurchlässigen Membran anliegende Verstärkungs-Faserflechtgebilde beeinflusst nachteilig das Durchfluß- und Filtrationsverhalten der Rohrmembran.

Zur Vermeidung der Problematik des ungewollten Auftrennens der thermisch hergestellten Verbindungsnahte bei einer spiralförmig aufgewickelten Rohrmembran aus einem streifenförmigen Fließkörper unter der Einwirkung des anstehenden Fluiddruckes schlägt die DE 199 09 930 A1 einen tubulären Verbund aus einem Geflecht aus Faden-Bündeln und/oder Drähten, vorzugsweise in Form eines elektronenleitenden Materials und einer darüber angeordneten Schicht eines ionenleitenden Materials, als Brennstoffzellenelement vor. Bei dieser bekannten Lösung wird unter anderem zum Herstellen einer sogenannten PEM-Brennstoffzelle vorgeschlagen, die rohrförmige Innenelektrode bestehend aus Kohlefasern und/oder Metalledröhten mittels einer Flechtmaschine zu erzeugen. Dieses tubuläre Geflecht läuft zur Zentrierung auf einem Dorn bis zu einer Auftragsdüse für die Katalysatorbeschichtung, wobei der Düsendurchmesser die Dicke der Katalysatorschicht bestimmt. Nach einer kurzen Trockenstrecke durch z. B. Keramik-

heizkörper durchläuft das beschichtete Geflecht eine Ringspaltdüse über die die ionenleitfähige Membran in Form einer Polymer-Lösung aufgetragen wird. Diesem Schritt schließt sich eine längere Trockenstrecke zur Austreibung des Lösemittels an. Nachfolgend wird eine zweite Katalysatorschicht mit einer Auftragsdüse aufgebracht und danach wird die Außenelektrode um die noch pastöse Katalysatorschicht geflochten. Die pastöse Konsistenz der Katalysatorschicht ermöglicht ein Eindringen der Geflechtstränge und damit einen innigen Verbund zwischen Katalysator und Elektrode. Wird dieser tubuläre Verbund zumindest teilweise bestehend aus einem flächigen Fadengeflecht entsprechend hohen Fluidrücken ausgesetzt, ist nicht auszuschließen, dass aufgrund der auftretenden Längs- und Querspannungen im Fadengeflecht sich die Fäden im Verbund gegeneinander verschieben, und dergestalt kann es zu unerwünschten Verstreckeffekten kommen, insbesondere auch bei der Herstellung des Geflechtes vor der eigentlichen Beschichtung mit dem Membranmaterial, was zur Folge hat, dass die bekannte rohrförmige Membran eine Gestalt einnimmt, insbesondere sich im Durchmesserbereich derart ändert, dass sie für den späteren Einsatzzweck untauglich werden kann.

Ausgehend von diesem Stand der Technik liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, die bekannten technischen Verfahrenslösungen zum Herstellen von rohrförmigen Membranen dahingehend weiter zu verbessern, dass mit hoher Produktionsgeschwindigkeit und zu niedrigen Kosten funktionssicherer Rohrmembranen zu erhalten sind, die weder während ihrer Herstellung noch im späteren Betrieb unerwünschte Verstreckeffekte mit Änderung der Membrangeometrien aufweisen. Eine dahingehende Aufgabe löst ein Verfahren mit den Merkmalen des Patentanspruches 1 in seiner Gesamtheit.

Dadurch dass gemäß dem kennzeichnenden Teil des Patentanspruches 1 ein Rohrkörper aus mehreren Fäden derart aufgebaut wird, dass entlang von

stegartigen Verbindungslinien eine im wesentlichen feste Verknüpfung zumindest eines Teils der Fäden erfolgt, dass zwischen den stegartigen Verbindungslinien zumindest ein Teil der Fäden die Querverbindung zwischen den einander benachbarten Verbindungslinien vornimmt, und dass ein vorgebbares Membranmaterial auf den Rohrkörper aufgebracht wird, ergibt sich ein sehr kostengünstiges Herstellungsverfahren mit dem sich sehr hohe Ausstoßraten an rohrförmigen Membranen erhalten lassen. Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren lassen sich vor dem Auftragen des Membranmaterials Rohrkörper erhalten, in der Art eines Leitergestrickes oder Rundleitergestrickes und mit dem genannten Leitergestrickmuster lassen sich etwaig auftretende Längszugspannungen mittels durchlaufender Längsfäden entlang der stegartigen Verbindungslinien sicher aufnehmen. Die Umschlingung an den Kreuzungspunkten des Leitergestrickmusters, also an den Stellen der im wesentlichen festen Verknüpfung zwischen den Verbindungslinien und den genannten Querverbindungen, vermeidet das Verschieben der Fadensysteme gegeneinander und der beschriebene ungewollte Verstreckeffekt während der Beschichtung ist minimiert, wobei die derart gewebeverstärkte Filtrationskapillare sehr hohen Innendrücken und mechanisch aufgebrachten Längszugkräften widersteht.

Im Gegensatz zu den geflochtenen Rohrkörpern, bei denen sich die Flechtbahnen unter entsprechender Beanspruchung oder Last gegeneinander verschieben können, kann es aufgrund der Umschlingung an den Stellen der festen Verknüpfung zwischen Verbindungslinien und Querverbindungen nicht zu Verschiebungen kommen, so dass etwaige Längs- oder Querbewegungen des Fadensystems allein durch die Eigenelastizität des eingesetzten Fadenmaterials bestimmt sind. Insoweit ergeben sich bei Einsatz des erfindungsgemäßen Verfahrens sehr form- und druckstabile Rohrkörpergebilde, sowohl bei der Herstellung der Membranrohre als auch bei deren späterer

Verwendung im Ultra- oder Nanofiltrationsbereich von Fluiden jedweder Art einschließlich in den Bereichen Wasser- und Getränkebehandlung.

Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der als Leitergestrick ausgebildete Rohrkörper mittels einer maschinellen Häkeleinrichtung erstellt, wobei jedem eingesetzten Faden eine eigene Haken- oder Häkelnadel zugeordnet wird. Beim Häkeln handelt es sich dem Grunde nach um ein Handarbeitsverfahren, wobei mit Hilfe der Haken- oder Häkelnadel der Faden „in der Luft“, also ohne Unterlage zu Schlingen geformt wird, wobei die ineinander hängenden Schlingen zu Mustern zusammengefügt werden können. Über die Häkeleinrichtung ist es möglich, Stütz- oder Haltefäden durchgehend längs den stegartigen Verbindungslinien einzubringen, um dergestalt eine Art Grundgerüst zu schaffen, um dann die weiteren Fäden für die Umschlingung an den Kreuzungspunkten längs der Verbindungslinien einzusetzen sowie zum Herstellen des Querfadenverbundes zwischen den genannten Verbindungslinien.

Vorzugsweise wird der Rohrkörper durch Häkeln dabei derart erstellt, dass zwischen den einzelnen Querverbindungen Fluiddurchtrittsstellen hoher Durchflußrate ausgebildet werden, wobei die stegartigen Verbindungslinien im wesentlichen Fluid dicht oder mit geringerer Durchflußrate ausgebildet sind. Bei einer besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens, werden die genannten Fäden (Monofile oder Multifile) ausgewählt aus der Gruppe

- der Kunststoffmaterialien wie Polyester, Polyamide, andere Polymere, Carbon, Kevlar etc. oder
- der Metallwerkstoffe (Drähte) wie Nickel, Platin, Palladium, Gold, Silber, rostfreie Stähle etc. oder

- der katalytisch aktiven Werkstoffe wie Ruthenium, Rhodium, Iridium, Nickel etc. oder
- 5 - der sonstigen Werkstoffe wie Celluloseacetat, Glasfasern, Graphitpulver, Aktivkohle etc. oder

aus Mischungen und Verbindungen der vorstehend genannten Gruppen.

- 10 Die vorstehend genannte Auflistung macht deutlich, dass im Sinne des erfindungsgemäßen Verfahrens der Begriff Faden weit zu ziehen ist, und neben den üblichen Monofilament- und Multifilamentfäden andere linienförmige Elemente mit einschließt wie Garne, Drähte oder stabartige, auch aus Pulvern aufgebaute Komponenten.

15

Die benachbarten Querverbindungen die derart zwischen zwei Verbindungslinien angeordnet werden, begrenzen zwischen sich einen Winkel von  $10^\circ$  bis  $70^\circ$ , vorzugsweise von etwa  $25^\circ$  bis  $45^\circ$ , besonders bevorzugt von etwa  $30^\circ$ .

20

Bei einer weiteren besonders bevorzugten Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens wird der Rohrkörper mit einer Membran aktivierbaren Substanz beschichtet, die durch ein Fällungsbad geführt wird, wobei eine Umwandlung der Substanz in eine mikroporöse Membranschicht erfolgt.

25

Als Membranmaterialien kommen insbesondere solche aus der Gruppe der Kunststoffmaterialien in Frage wie Polyethersulfon (PES), Polysulfon (PSU), Polyacrylnitril (PAN) oder Polyvinylidenfluorid (PVDF).

30

Im folgenden wird das erfindungsgemäße Verfahren anhand eines Ausführungsbeispieles nach der Zeichnung näher erläutert. Dabei zeigt die einzige Figur in prinzipieller und nicht maßstäblicher Darstellung eine stimmseitige, perspektivische Vorderansicht auf einen Ausschnitt der rohrförmigen Membran in deutlich vereinfachter Wiedergabe.

Das erfindungsgemäße Verfahren zum Herstellen von rohrförmigen Membranen sieht vor, dass ein als Ganzes mit 10 bezeichneter Rohrkörper aus mehreren Fäden 12 derart aufgebaut wird, dass entlang von stegartigen Verbindungslinien 14 eine im wesentlichen feste Verknüpfung zumindest eines Teils der genannten Fäden 12 erfolgt, wobei zwischen den stegartigen Verbindungslinien 14 zumindest ein Teil der Fäden 12 die Querverbindung 16 zwischen den einander benachbarten Verbindungslinien 14 vornimmt, und wobei ein vorgebbares Membranmaterial 18 auf dem Rohrkörper 10 aufgebracht wird. Die stegartigen Verbindungslinien 14 bilden dabei eine Art Längsfadensystem aus, dass über die Querfäden 12 der jeweiligen Querverbindung 16 eine Art Leitergestrick, insbesondere Rundleitergestrick, ausbildet.

Für den Erhalt des dahingehenden Leitergestrickes wird der Rohrkörper 10 mittels einer industriellen Häkeleinrichtung erzeugt, wobei jedem eingesetzten Faden eine eigene Haken- oder Häkelnadel zugeordnet wird. Da dahingehende maschinelle Häkeleinrichtungen Stand der Technik sind, wird insoweit auf die Häkelerstellung des Rohrkörpers 10 nicht weiter Bezug genommen. Jedenfalls wird der Rohrkörper 10 durch das genannte Häkeln derart erstellt, dass zwischen den einzelnen Querverbindungen 16 in Form der dahingehenden Querfäden 12 Fluiddurchtrittsstellen 20 hoher Durchflußrate gebildet werden, wobei die stegartigen Verbindungslinien 14 als Längsfadensystem im wesentlichen fluiddicht oder mit demgemäß geringerer Durchflußrate ausgebildet werden. Der einfacheren Darstellung

wegen wurde in der Figur die Umschlingung der Fäden 12 von Querverbindungen 16 mit den stegartigen Verbindungslinien 14 als Verknüpfungskugeln 22 dargestellt, wobei in Wirklichkeit bedingt durch das Häkelverfahren die dahingehenden Kugeln 22 durch miteinander verbundene Maschen oder Knotenpunkte gebildet sind, und wobei die gebildeten Verbindungsmaschen entlang den Verbindungslinien 14, die beidseitig also rechts und links zu den Fäden 12 der Querverbindungen 16 übergehen, zusätzliche Längsfäden 12 mit aufweisen, die zusätzlich die Stabilität und die Längszugfestigkeit für den Rohrkörper 10 erhöhen.

10

Die eingesetzten Fäden 12 für die Querverbindungen 16 sowie für deren Verknüpfung miteinander entlang den Stellen 22 im Übergangsbereich zu den stegartigen Verbindungslinien 14 bestehen aus multifilen Kunststoffäden, beispielsweise aus Polyester oder Polyaramiden, wobei hier auch andere Polymere zum Einsatz kommen können. Zur Erhöhung der Festigkeit sind jedoch die Längsfäden entlang der stegartigen Verbindungslinien 14 aus Carbonfasermaterialien aufgebaut. Will man beispielsweise die dahingehende Rohrmembran als Brennstoffzellenelement oder dergleichen einsetzen, besteht die Möglichkeit einen Teil der Fäden aus einem elektronenleitenden Material aufzubauen und einen anderen Teil der Fäden aus einem ionenleitenden Material. Ferner kann das Fadensystem das Ionenleitend wirkt mit einer Katalysatorschicht versehen werden, die zusätzlich mit Hydrophobierungsmitteln und/oder Protonenleitermaterial zusätzlich versehen sein kann. Auch besteht dergestalt die Möglichkeit die beschriebene Rohrmembran als bipolare Ionentauschermembran zu verwenden, um dergestalt Milchsäure oder dergleichen zu gewinnen. Durch Einsatz von Metalldrähten als Fadensystem läßt sich auch das elektrische Ladungspotentialvermögen der Rohrmembran mit vorgeben.

15

20

25



Im vorliegenden Fall besteht der Rohrkörper 10 aus acht Verbindungslinien 14 sowie aus acht Querverbindungsflächen 16. Als besonders vorteilhaft haben sich jedoch Rohrkörper 10 (nicht dargestellt) erwiesen, die aus sechs Verbindungslinien 14 und sechs Querverbindungen 16 aufgebaut sind. Minimal Voraussetzung zum Aufbau eines im Querschnitt dreieckförmigen Rohrkörpers 10 (nicht dargestellt) ist, diesen aus drei Verbindungslinien 14 mit drei Querverbindungen 16 aufzubauen.

Um den derart hergestellten Rohrkörper 10 nunmehr mit einer Membran aktivierbaren Substanz zu beschichten, wird dieser durch ein Fällungsbad geführt, wobei eine Umwandlung der Substanz in eine mikroporöse Membranschicht erfolgt. Ein dahingehendes Verfahren ist beispielhaft in der WO 03/076055 A1 offenbart, so dass an dieser Stelle hierauf im Detail nicht mehr näher eingegangen wird. Die bekannte Lösung nach der WO-Veröffentlichung betrifft ein Verfahren zur Herstellung gewebeverstärkter kapillarförmiger Membranen, insbesondere für die Ultrafiltration, bei denen jeweils ein Gewebeschlauch mit einer Polymerlösung beschichtet und durch ein Fällungsbad geführt wird, wobei in dem Fällungsbad eine Umwandlung der Polymerlösung in eine mikroporöse Schicht erfolgt. Derart wird eine durch den Gewebeschlauch verstärkte Membran gebildet. Dabei durchläuft der mit der Polymerlösung beschichtete Gewebeschlauch das Fällungsbad ohne mechanische Berührung von oben nach unten und tritt durch eine unterseitige Düse aus. Durch die Düse fließt Flüssigkeit ab, welche eine den Lauf des beschichteten Gewebeschlauches stabilisierende Zugkraft auf die das Fällungsbad verlassende Kapillarmembran ausübt. Das dahingehende Beschichtungsverfahren ist nur beispielhaft herausgegriffen und es gibt eine Vielzahl anderer Beschichtungsverfahren einschließlich Tauchbadverfahren die hier zum Einsatz kommen können. Als Membranmaterial wird ein solches aus der Gruppe der Kunststoffmaterialien ausge-

wählt wie Polyethersulfon (PES), Polysulfon (PSU), Polyacrylnitril (PAN) oder Polyvinylidenfluorid (PVDF).

Die erfindungsgemäße Rohrmembran läßt sich fortlaufend und somit kostengünstig herstellen, d. h. der Rohrkörper 10 wird permanent über das Häkelverfahren bereitgestellt für das anschließende Beschichtungsverfahren mit dem Membranmaterial 18. Aufgrund der Ausgestaltung des Filtermaterials in Form eines Leitergestrickes bzw. Rundleitergestrickes durch Einsatz der konventionellen Häkeltechnik, entsteht ein Filterrohr, bei dem die bei der Filtration auftretenden Längszugspannungen von den durchlaufenden Längsfäden entlang den stegartigen Verbindungslinien 14 aufgenommen werden, wobei die Spannungen am Umfang durch die querverlaufenden Fäden 12 des Gewebelagenverbundes mittels der flächenförmigen Querverbindungen 16 sicher aufgenommen sind. Die Umschlingung an den Kreuzungspunkten (Kugeln 22) vermindert das Verschieben der Fäden 12 gegeneinander, so dass unerwünschte Verstreckeffekte sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung des Rohrkörpers 10 während der Beschichtung mit dem Membranmaterial deutlich minimiert sind und die derart gewebeverstärkte Filtrationskapillare widersteht sehr hohen Innendrücken und Längszügen bei der Filtration. Als Fadenstärke können hierbei Fäden 12 mit einem Durchmesser von 20 bis 200  $\mu\text{m}$  eingesetzt werden und die Fadenanzahl entlang der Linien 14 liegt vorzugsweise bei drei bis sechs Stück.

Praktische Versuche haben ergeben dass bei vergleichbaren Dimensionierungen durch die gewählte technische Lösung als Rundleitergestrick Zugfestigkeiten von 100 N/mm<sup>2</sup> erreichbar sind bei einer Reißdehnung von 1 bis 5% und im dynamischen Drucktest halten solche Rohre einem Berstdruck von ca. 30 bis 60 bar ohne weiteres Stand, wobei eine Verkürzung des Rohres von nur 1% beobachtet wird, so dass eine sichere Festlegung des als Rundleitergestrick ausgebildeten erfindungsgemäßen Membranrohres in

einer Haltevorrichtung, insbesondere in Form mindestens eines Moduls (nicht dargestellt) einer Gesamtfiltrationsanlage gewährleistet ist.

## Patentansprüche

- 5 1. Verfahren zum Herstellen von rohrförmigen Membranen, dadurch gekennzeichnet, dass ein Rohrkörper (10) aus mehreren Fäden (12) derart aufgebaut wird, dass entlang von stegartigen Verbindungslinien (14) eine im wesentlichen feste Verknüpfung zumindest eines Teils der Fäden (12) erfolgt, dass zwischen den stegartigen Verbindungslinien (14) zu-
- 10 mindest ein Teil der Fäden (12) die Querverbindung (16) zwischen den einander benachbarten Verbindungslinien (14) vornimmt, und dass ein vorgebbares Membranmaterial (18) auf den Rohrkörper (10) aufgebracht wird.
- 15 2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass der Rohrkörper (10) mittels einer Häkeleinrichtung erstellt wird und dass jedem eingesetzten Faden eine eigene Haken- oder Häkelnadel zugeordnet wird.
- 20 3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass der Rohrkörper (10) durch Häkeln derart erstellt wird, dass zwischen den einzelnen Querverbindungen (16) Fluiddurchtrittsstellen (20) hoher Durchflußrate ausgebildet werden, und dass die stegartigen Verbindungslinien (14) im wesentlichen fluiddicht oder mit geringer Durchflußrate ausgebildet werden.
- 25

4. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Fäden (Monofile oder Multifile) ausgewählt werden aus der Gruppe

5

- der Kunststoffmaterialien wie Polyester, Polyamide, andere Polymere, Carbon, Kevlar oder
- der Metallwerkstoffe (Drähte) wie Nickel, Platin, Palladium, Gold, Silber, rostfreier Stahl oder
- der katalytisch aktiven Werkstoffe wie Ruthenium, Rhodium, Iridium, Nickel oder
- der sonstigen Werkstoffe wie Celluloseacetat, Glasfasern, Graphitpulver, Aktivkohle oder

10

aus Mischungen und Verbindungen der vorstehend genannten Gruppen.

15

5. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 4, dadurch gekennzeichnet, dass die benachbarten Querverbindungen (16) derart zwischen zwei Verbindungslinien (14) angeordnet werden, dass diese zwischen sich einen Winkel von 10 bis 70°, vorzugsweise von etwa 30°, einschließen.

20

6. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass der Rohrkörper (10) aus mindestens drei vorzugsweise aus sechs Verbindungslinien (14) aufgebaut wird, zwischen denen sich drei vorzugsweise sechs Flächen an Querverbindungen (16) erstrecken, auf denen das Membranmaterial vermehrt aufgetragen wird.

25

7. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 6, dadurch gekennzeichnet, dass der Rohrkörper (10) mit einer membranaktivierbaren Substanz beschichtet wird, die durch ein Fällungsbad geführt wird, wobei eine

30

Umwandlung der Substanz in eine mikroporöse Membranschicht erfolgt.

- 5 8. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 7, dadurch gekennzeichnet, dass als Membranmaterialien solche aus der Gruppe der Kunststoffmaterialien ausgewählt werden wie Polyethersulfon, Polysulfon, Polyacrylnitril oder Polyvinylidenfluorid.
- 10 9. Rohrmembran hergestellt nach einem Verfahren nach einem der Patentansprüche 1 bis 8, dadurch gekennzeichnet, dass der Rohrkörper (10) aus mehreren Fäden (12) derart aufgebaut ist, dass entlang von stegartigen Verbindungslinien (14) eine im wesentlichen feste Verknüpfung zumindest eines Teils der Fäden (12) vorliegt, dass zwischen den stegartigen Verbindungslinien (14) zumindest ein Teil der Fäden (12) die  
15 Querverbindung (16) zwischen den einander benachbarten Verbindungslinien (14) bildet, und dass ein vorgebbares Membranmaterial (18) auf den Rohrkörper (10) aufgebracht ist.

